

# 論文審査の結果の要旨

氏名 中間 智弘

本論文は、6章からなり、第1章は序章である。現在の宇宙の構造の起源はインフレーションなどの初期宇宙で生成された原始ゆらぎが種と考えられているが、その物理的機構は未だ分かっていない。また、問題になるエネルギースケールは地上加速実験でも到達不可能である。このため、原始ゆらぎの物理の解明は宇宙論および素粒子物理学における最重要課題の一つである。この章では、最近の宇宙論的観測による研究の進展、原始ゆらぎの制限の現状、初期宇宙に生成され得る原始ブラックホール、また高赤方偏移クェーサーの観測から示唆されている超巨大ブラックホールの問題がレビューされている。これら宇宙論の未解決問題の重要性が述べられており、本研究の物理的動機付けが与えられている。

第2章では、初期宇宙（輻射優勢期）における原始ブラックホール形成のシナリオがレビューされている。極初期宇宙では輻射の高密度のために重力が非常に大きく、宇宙膨張・力学的時間スケールが非常に短い。短波長スケールに異常振幅の原始ゆらぎがあった場合に、その領域がホライズン（因果律を持ちうる領域）内に入った以降、次第に宇宙膨張を離れ、収縮に転じ、輻射圧でもその収縮を止めることができず、原始ブラックホールが形成される可能性がある。本論文では、このシナリオを再考しており、一般相対論に基づき球対称崩壊模型の数値計算を行い、より厳密なブラックホールの形成条件を導出している。異常振幅のゆらぎの閾値が  $\delta_{\text{th}} \sim 0.4$  という結果である。また、原始ブラックホールの蒸発が及ぼす CMB の黒体輻射スペクトルへの歪み効果は観測されていない、あるいはマイクロ重力レンズの観測で現宇宙で原始ブラックホールが発見されていないという事実から、短波長スケールにおける原始ゆらぎの振幅についての制限がレビューされている。

第3章では、原始ブラックホールが、高赤方偏移  $z \sim 6$  のクェーサーの観測で示唆されている超巨大ブラックホール（質量が約  $10^9$ - $10^{10}$  太陽質量）の起源にな

り得るシナリオが議論されている。上述したように原始ブラックホールの形成には、輻射優勢期にホライズンに入る短波長スケールで、 $\delta > 0.4$  などの異常振幅を持つ密度ゆらぎの存在が必要条件になる。しかし、単純なインフレーションモデルが予言する略スケール不変な原始ゆらぎのシナリオでは、このような短波長スケールの異常振幅のゆらぎがあった場合には、あらゆる波長スケールに異常振幅のゆらぎが存在し得ることを意味し、観測と矛盾する。そこで本研究では、ある特定の狭い波長領域に異常振幅のゆらぎがあるシナリオを調べている。赤方偏移で  $z \sim 2 \times 10^7$  の輻射優勢期にホライズンに再突入する波長スケールに着目し、その波長に異常振幅のゆらぎ領域があった場合、その領域から質量で  $10^{10}$  太陽質量の原始ブラックホールが生成される、また宇宙背景放射の黒体放射スペクトルの歪みの観測的制限に矛盾しないことを示した。このシナリオが本当であれば、キューサーの超巨大ブラックホールの起源を説明するシナリオになり得る。さらに、現宇宙のホライズン（観測可能領域）内に、ごく稀に上記の異常振幅の原始ゆらぎをもつ領域を生成するモデルとして、2つのスカラー場が存在するインフレーションモデルを提案している。

第4章では、宇宙背景放射（CMB）や宇宙の大規模構造の観測では制限できていない短波長スケール（ $\sim 10\text{--}100\text{pc}$ ）の原始ゆらぎの振幅に制限を導出している。赤方偏移で  $z > 2 \times 10^6$  にハッブル領域内に入る短波長スケールに異常振幅の原始ゆらぎがあった場合、そのゆらぎは熱平衡にある光子とプラズマ間に音響振動を引き起こすが、頻繁な相互作用のため、ゆらぎのエネルギーが熱平衡のエネルギーに変換される（Acoustic reheating = 音響再加熱）。通常のシナリオに比較して、この効果はCMB光子の数密度を変更する。しかし、CMB光子とバリオンの数密度比（ $\eta$ ）はビッグバン軽元素合成（BBN；  $z \sim 10^{10}$ ）とCMB（ $z \sim 1000$ ）の観測により精密に制限されている。上記のCMB光子へのエネルギー注入は、時期としてBBNとCMBの間に起こり得るので、逆にこのような異常振幅のゆらぎがあった場合、BBNとCMBの各々の観測が示唆する光子バリオン数密度比に矛盾が生じ得る。この矛盾は観測されていない事実を用い、本研究は上述の短波長スケール（ $\sim 10\text{--}100\text{pc}$ ）の原始ゆらぎの振幅に上限を導出することに成功した。この制限は世界で初めてであり、その重要性から、この研究はPhysical Review Lettersに掲載されている（Nakama, Suyama & Yokoyama Phys. Rev. Letters 113, 061302）。

第5章では、短波長スケールの原始テンソルゆらぎの制限を導出している。インフレーションなどのシナリオは、重力ポテンシャルや密度ゆらぎなどのスカラー型ゆらぎに加えて、一般に原始重力波起源のテンソル型ゆらぎの存在も予言する。本研究では、短波長スケールに異常振幅のテンソルゆらぎがあった場合のシナリオを考えている。スカラー型、テンソル型のゆらぎは、アインシュタインの重力理論を通して、共進化する。異常振幅のテンソル型ゆらぎがあった場合には、アインシュタイン方程式の非線形性より、2次的なテンソル型ゆらぎを重力源として、同程度の短波長スケールに非線形なスカラー型ゆらぎを誘発する。この場合、増幅した密度ゆらぎから原始ブラックホールが生成され得る。逆に、原始ブラックホールが観測されていないという事実から、短波長スケール( $10^6$ - $100\text{pc}$ )のテンソル型ゆらぎの振幅に上限を導出することに成功した。この制限はこれまでの上限よりも厳しいものであり、その意義は大きい。

最後に、第6章では、本論文のまとめが述べられている。

このように本論文は、これまでの宇宙論観測から制限されていない短波長スケールの原始ゆらぎに着目し、その原始ゆらぎの振幅を制限する新たな方法の提案、理論模型の構築、また宇宙論観測から原始ゆらぎの振幅に上限を導出しており、その学問的意義は高いと考えられる。さらに、天文学の未解決問題である超巨大ブラックホールについても、短波長の異常振幅の原始ゆらぎから生成した原始ブラックホールが説明になり得るというシナリオが提案されており、素粒子・天文学に跨がる研究も展開されている。なお、本論文3章以降5章までが論文提出者の研究に基づいて書かれており、郡氏（第3章）、須山氏（3、4、5章）、横山氏（4章）との共同研究であるが、論文提出者が主体となって解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。